

# 8

## GENEETTINEN MUUNTELU LAJIEN SOPEUTUMISEN JA SÄILYMISEN ELINEHTONA

HELENA KORPELAINEN

Kuvittele, että ihmislajin kaikki yksilöt olisivat identtisiä kopioita toisistaan eli samaa kloonina. Sukupuolella ei olisi merkitystä, ja ihmiset lisääntyisivät kasvullisesti ilman sukusoluja. Olisiko yksilöillä oma identiteetti, entä olisiko sukulaisuussuhteita olemassa? Kuinka yksilöiden ikä määritettäisiin, olisiko se kenties ihmislajin ikä eli noin 200 000 vuotta? Todellisuudessa ihminen ja lähes kaikki selkärangaiset lisääntyvät luonnossa suvullisesti sukusolujen välityksellä. Keinotekoisesti selkärangaisia on kloonattu jo jonkin aikaa, esimerkiksi lemmikkien kopiointi on rahakasta liiketoimintaa joissakin maailmankolkissa. Muissa eliöryhmissä suvuton lisääntyminen tai suvullisen ja suvuttoman lisääntymisen vuorottelu on yleistä. Tietävästi suurin yksittäinen kloonointi löytyy Yhdysvaltojen Oregonin osavaltion metsistä, se on mäntymesisien *Armillaria ostoyae*, jonka rihmasto kattaa lähes yhdeksän neliökilometrin alueen ja jonka arvellaan olevan vähintään 2400 vuoden ikäinen.<sup>1</sup> Kyvystä lisääntyä suvuttomasti on käytännön hyötyä, sillä kloonaus on avuksi esimerkiksi hedelmä- ja marjakasvien taimien tuotannossa.

### ONGELMANA PIENI POPULAATIOKOKO

Geneettinen muuntelu eli polymorfismi tarkoittaa eliöyksilöiden välillä esiintyviä geenien aiheuttamia eroja, erityisesti populaation sisällä esiintyvää vaihtelua. Se on olennainen biodiversiteetin perusta ja välttämätön edellytys eliöiden evoluutiolle ja sopeutumiselle ympäristöön. Geneettistä muuntelua voi verrata vaikkapa osakesijoitus-

salkkuun, jossa riskiä pienennetään hajauttamalla eli omistamalla usean yrityksen osakkeita, mutta osakkeiden sijasta tarkastellaan geenien monipuolisuutta. Joskus jossakin populaatiossa muuntelu saattaa olla heikkoa alleelien eli geenimuotojen valikoiman vähäisyyden takia. Tällöin eliöt eivät välttämättä kykene reagoimaan muuttuviin ympä-ristöoloihin, ja ne voivat jopa kuolla sukupuuttoon. Näin menetetään pysyvästi ainutlaatuisia geenejä, mikä tarkoittaa äärimmäistä geneet-tistä köyhtymistä. Ilmastonmuutoksen myötä kyky reagoida ja sopeu-tua muuttuviin oloihin on entistä tärkeämpää. Heikko geneettinen muuntelu saa siis aikaan geneettisen riskin, jolloin kyky evoluutioon ja sopeutumiseen muuttuvaan ympäristöön on alentunut. Geneettisen muuntelun vähäisyyden lisäksi uhanalaisille lajeille tyypillistä on alen-tunut yksilömäärä. Pieni yksilömäärä aiheuttaa demografisen riskin: jokin yhtäkkinen tapahtuma, kuten metsäpalo, tulva tai maankäytön muutos, voi tuhota kaikki yksilöt jopa riippumatta niiden geneettisestä sopeutumiskyvystä.

Pienet luonnonpopulaatiot ja monet jalostuksen kohteena olevat lajit kärsivät sukusiitoksesta, kun biologiset sukulaiset lisääntyvät keskenään. Sukusiitosaste on sitä korkeampi, mitä läheisempää sukua lisääntyvät yksilöt ovat toisilleen. Sukusiitoksessa jälkeläiset saavat osittain samoja geenejä vanhemmiltaan, jolloin perintötekijät yksipuolistuvat. Tällä on haitallisia vaikutuksia: esimerkiksi erilaiset resessiiviset eli väistyvästi periytyvät sairaudet pääsevät ilmenemään. Vaikka sukusiitoksen myötä tapahtuva haitallisten geenimuotojen yleistyminen voi johtaa siihen, että näitä muotoja kantavat heikot yksilöt eivät menesty luonnonvalinnassa, jolloin geeniperimä puhdistuu haitallisista mutaatioista, sen kokonaisvaikutus on yleensä haitallinen varsinkin pitkällä aikavälillä.

Luonnossa sukusiitos johtuu yleensä pienestä populaatiokoosta, jolloin yksilöillä ei ole muuta vaihtoehtoa kuin pariutua lähisukulaisten kanssa. Sukusiitosasteen kasvaessa menetetään samalla hyödyllistä geneettistä muuntelua ja kykyä sopeutua muuttuvaan ympäristöön. Vaikutuksiltaan haitallisten mutaatioiden rikastuminen heikentää yksilöiden elinkykyä ja jälkeläistuotantoa. Varsinkin eristyneissä luonnonpopulaatioissa, joissa sukusiitos on yleisintä ja joihin ei tule uutta geenimateriaalia muuttoliikkeen myötä, seurauksena on entistä vakavamman sukusiitoksen kierre.<sup>2</sup> Jalostustoiminnassa tehdään tyypillisesti niin sanottua positiivista valintaa, jolloin pyritään paitsi rikastamaan hyödyllisiä geenimuotoja myös karsimaan haitallisia geenejä. Tällaisen jalostuspopulaationkin koon pitäisi olla riittävä ja sukulaisuussuhteet olisi otettava huomioon. Liiallisen sukusiitoksen ehkäisy on tärkeää sekä luonnonsuojelutyössä että jalostustoiminnassa.

## **UUSI GENOMITIETO EDISTÄÄ GEPARDIN SUOJELUA**

Geneettisen muuntelun niukkuudesta ja epävarmasta tulevaisuudesta kärsiviä lajeja on paljon. Maailman nopein maanisäkäs, gepardi, on valitettavan hyvä esimerkki tästä. Gepardikanta on vähentynyt rajusti elinympäristön muutosten, saaliseläinten vähenemisen ja lajia heikentävän sukusiitoksen vuoksi. Nykyisin sekä Afrikan että Aasian kannat ovat uhanalaisia, yksilöiden kokonaislukumäärä on arviolta alle 8000, josta valtaosa on Afrikassa. Gepardi onkin aktiivisen suojelun ja tutkimuksen kohteena. Modernit molekyylogeneettiset menetelmät ovat

osoittaneet tehonsa geparditutkimuksessa: vuonna 2015 julkaistiin gepardin koko perimän rakenne eli genomisekvenssi, joka mahdollistaa sekä gepardin evolutiivisen historian tarkemman selvittämisen että tulevien tapahtumien ennustamisen.<sup>3</sup> Samalla löydettiin myös 11 lihas-toimintoihin liittyvää geeniä, jotka selittävät gepardin uskomattoman nopeuden. Iso tutkijaryhmä rakensi genomisekvenssin käyttämällä seitsemästä yksilöstä saatuja DNA-näytteitä. Aiempien geneettisten tutkimusten perusteella lajilla oli hyvin vähän geneettistä muuntelua ja sitä pidettiin malliesimerkkinä uhanalaisesta, geneettisesti köyhästä lajista.

Gepardin alkuperä on Pohjois-Amerikassa, josta se levisi noin 100 000 vuotta sitten Beringinsalmen kautta Aasiaan ja lopulta Afrikkaan. Pohjois-Amerikassa laji katosi monien muiden isojen nisäkkäiden ohella viimeisimmän jääkauden jälkeen 10 000–12 000 vuotta sitten. Gepardin historiasta löytyy monia geneettisiä pullonkauloja, jolloin yksilöitä on ollut vähän ja sukusiitoksesta on tullut yleistä. Syitä voi vain arvailla: ehkä taustalla oli levittäytyminen uusille alueille useana pienenä ryhmänä, tai populaatio saattoi kärsiä ilmastonmuutoksesta ja viimeisimmän jääkauden jälkeen myös metsästyksestä. Näiden pullonkaulojen sarja on aiheuttanut geneettisen muuntelun jyrkän vähenemisen. Jäljellä oleva muuntelun määrä on vain 0,1–4 prosenttia verrattuna useimpiin eliölajeihin. Gepardin muuntelu on selvästi vähäisempää kuin monilla muilla uhanalaisilla lajeilla, kuten äärimmäisen uhanalaisilla, yksilömääriltään vähäisemmillä siperiantiekerillä ja vuorigorillalla. Selityksenä on epäilemättä pullonkaulavaikutuksen mittava rooli gepardin evoluutiohistoriassa. Laji kärsii liian kapeasta geneettisestä materiaalista ja samalla lisääntymisongelmista, joihin syynä on enimmäkseen siittiöiden huono laatu. Lisäksi sen vaivana ovat alhainen elinkykyisyys ja herkyys tartuntataudeille.

Aasian ja Afrikan gepardien kehityslinjat polveutuvat evolutiivisessa mielessä äskettäin eli alle 12 000 vuotta sitten eläneistä esi-isistä. Siten kaikki nykyiset gepardit polveutuvat myöhäispleistoseenikaudelta, jolloin yksilöiden ja muuntelun määrä laski rajusti. Muuntelun palautuminen mutaatioiden avulla on erittäin hidasta, kun taas yksilöiden määrä voisi lisääntyä rajustikin ympäristön ollessa lajille suotuisa. Yksilömäärän noustessakin lajin tulevaisuus on edelleen epävarma, koska heikko geneettinen muuntelu rajoittaa sopeutumiskykyä. DNA-sekvenssitiedot osoittavat, että Aasian ja Afrikan gepardien ja toisaalta eri osissa Afrikkaa nykyisin elävien gepardien linjat ovat eronneet vain

4000–6000 vuotta sitten. Vertailukohtana voidaan pitää Afrikan ja Aasian leijonia, joiden kehityslinjojen eriytymisestä on kulunut noin 100 000 vuotta. Uudet genomitason tulokset ovat tärkeitä gepardin suojelutölle: niiden perusteella Afrikan gepardin käyttäminen Aasiassa kannanhoidon tukena on biologisesti perusteltua.

## **ONKO KOIRIEN JALOSTUS MENNYT LIIAN PITKÄLLE?**

Koirarodut ovat hyvä esimerkki jalostuksesta aiheutuneesta pienten populaatioiden geneettisistä ongelmista. Maailmassa on yli 400 koirarodua. Usean vuosisadan aikana tehty jalostus on tuottanut nykyiset rodut, joissa on valtava koon (kokovaihtelu 40-kertainen), ulkonäön ja muiden ominaisuuksien kirjo. Kokonaisuudessaan koirilla on melko paljon geneettistä muuntelua, mutta yksittäisten rotujen sisäinen muuntelu on usein niukkaa. Monet rodut on jalostettu tiettyyn käyttötarkoitukseen, kuten metsästykseen, paimennukseen, vahtikoiriksi ja seurakoiriksi. Osaroduista on perustettu vain muutamasta kantavanhemmasta, jolloin sukulaisten parittaminen ja sitä seuraava sukusiitos ja geneettinen homotsygoituminen eli samanlaisten geenimuotojen periytyminen molemmilta vanhemmilta ovat olleet lähes väistämättömiä. Toisaalta joidenkin rotujen jalostus on perustunut voimakkaaseen valintaan ja samalla pienen yksilömäärän (usein sukulaisten) käyttöön jalostuksessa. Siten sekä pienet populaatiokoot että sukusiitos haitallisine terveys- ja lisääntymisvaikutuksineen ovat todellisia ongelmia ja riskitekijöitä koirien hyvinvoinnille.

Koiria on tutkittu paljon, myös geneettisesti. Genomisekvenssi julkaistiin jo vuonna 2005 kansainvälisen yhteistyön tuloksena. Koirien geneettisiä ominaisuuksia tunnetaan yli 700, joista yli puolet on genomitutkimuksen erityisenä kiinnostuksen kohteena olevia perinnöllisiä sairauksia. Monet sairauksista vastaavat ihmisten sairauksia, jolloin tutkimustieto on sovellettavissa myös ihmiseen. Usein sairaus esiintyy vain yhdellä tai muutamalla rodulla, mikä sekin kuvastaa yksittäisten koirarotujen geneettisten ominaisuuksien eriytymistä. Koirien monipuolinen DNA-tieto ja kehitetyt perinnöllisten sairauksien diagnosointimenetelmät ovat tärkeä apu koirien terveydenhoidossa ja jalostustyössä.<sup>4</sup> Osa terveysongelmista on seurausta liioitellusta, jopa epäeettisestä ulkomuotojalostuksesta. Tästä esimerkkinä voidaan antaa

mopsin lyhyt kuono ja ahtaat ilmatiet, minkä vuoksi se kärsii hapenpuutteesta ja sydänongelmista. Alkuperältään suomalaisia koirarotuja on viisi: suomenajokoirra, suomenpystykorva, karjalankarhukoirra, lapinporokoirra ja suomenlapinkoirra. Niitä on rekisteröintimäärien perusteella Suomessa paljon, ja geneettisen muuntelun tasoltaan ja terveydeltään ne ovat varsin hyvinvoivia.

Koirien jalostamisen ja ylipäänsä lisääntymisen ydin on säilyttää sukusiitosaste kestäväällä tasolla, jotta välttyään sukusiitoksen haittavaikutuksilta. Isossa-Britanniassa tehdyssä laajassa, 215 rotua käsittäneessä tutkimuksessa saatiin selville, että sukusiitosaste oli korkeimmillaan 1980- ja 1990-luvuilla yksipuolisen urosmateriaalin käytön takia, mutta tilanne on parantunut vuoden 2000 jälkeen.<sup>5</sup> Tilanne oli samankaltainen sekä yleisillä että harvinaisilla koiraroduilla, joskin hieman heikompi harvinaisilla roduilla. Entistä paremmin huomioitua sukusiitosriskiä ja monipuolisemman materiaalin käyttö ovat olleet eduksi koirien terveydelle ja rotujen säilymiselle. Lähes kaikkien nisäkäslajien jalostuksessa tyypillinen ongelma on epäsuhta lisääntymiseen

käytettävissä uros- ja naarasmäärissä. Ääriesimerkkinä ovat lypsykarjan sonnit, jotka voivat saada tuhansia tai jopa kymmeniä tuhansia jälkeläisiä mutta lehmät vain muutaman. Tällainen yksipuolinen uros-materiaali on tärkein syy sukusiitokseen, ja siksi jalostajan ja karjankasvattajan paras keino taistella sukusiitosta vastaan on välttää yksittäisten urosten ylenmääräistä käyttöä. Koirien sukusiitos on yleensä voimakkaampaa kuin muiden kotieläinten, mitä selittävät yksittäisten urosten ylikäytön lisäksi rotujen usein pienehköt yksilömäärät.

## GENEETTISEN MUUNTELUN EKOLOGISET VAIKUTUKSET

Geneettisen monimuotoisuuden tarkastelussa painotetaan lajin ja sen populaatioiden sopeutumiskykyä ja mahdollisuutta evoluutioon. Geneettisellä muuntelulla voi lisäksi olla tärkeitä ekologisia vaikutuksia populaatiodynamiikkaan, lajien väliseen kilpailuun, eliöyhteisöjen rakenteeseen ja ekosysteemien perustuotantoon sekä energia- ja ravinnevirtoihin. Esimerkiksi hyönteisten tarjoamat pölytyspalvelut ovat ehdottoman tärkeitä ekosysteemeille ja maataloustuotannolle. Maailmanlaajuisesti on tehty huolestuttavia havaintoja pölytyksestä vastaavien lajien ja niiden yksilömäärien romahtamisesta. Syyt ovat epäselvät, mutta geneettinen monimuotoisuus on tunnetusti populaatioiden menestystekijä, ja sillä on epäilemättä vaikutusta myös pölyttäjien kykyyn selviytyä muuttuvissa ympäristöissä. Voidaanakin väittää, että geneettisellä monimuotoisuudella on ekologista merkitystä niin populaatio- kuin eliöyhteisö- ja ekosysteemitasolla, ja sen vaikutus saattaa olla verrattavissa lajidiversiteetin eliöyhteisöä vakauttavaan vaikutukseen.<sup>6</sup> Geneettisen muuntelun ekologisia seurauksia on tutkittu varsin vähän, mutta joitakin suuntaa antavia tuloksia on löytynyt. Tarkemmat tiedot geneettisen muuntelun ekologisista vaikutuksista syventäisivät samalla ymmärrystä evolutiivisten ja ekologisten prosessien vuorovaikutuksesta. Tiedolla olisi myös käytännön vaikutuksia niin suojelutyöhön kuin maatalouteenkin.

Jo pitkään on kokeiltu geneettisesti erilaisten lajikkeiden sekakasvustoja, ja esimerkiksi perunoilla, kaalilla, pavuilla ja nurmikasveilla on saatu näyttöä siitä, että suurempi lajikediversiteetti tuottaa paremman sadon ja vähentää kasvitautien ja tuholaisten aiheuttamaa vahinkoa. Vastaa-vasti geneettinen monimuotoisuus edistää tarhamehiläisyhdyskunnan

tuottavuutta ja elinikää, joskaan muuntelun hyödyt eivät kasva loputtomiin: yhdyskunnan jäsenten keskimääräisen sukulaisuusasteen väheneminen muuntelun lisääntyessä voi lopulta haitata yhdyskunnan sisäistä dynamiikkaa. Nämä ovat esimerkkejä populaatiotason vaikutuksista. Kaikki tulokset eivät ole kuitenkaan olleet samansuuntaisia. Esimerkiksi viherlevillä havaittiin usean levägenotyypin yhdistelmän kasvavan keskimääräistä monokulttuuria tehokkaammin. Syynä näytti lopulta olevan valinta, minkä seurauksena yksittäinen voimakaskasvuinen genotyyppi kasvatti osuuttaan ja lopulta vaikutti keskimääräiseen tulokseen omaa alkuperäistä osuuttaan enemmän. Todellinen monimuotoisuuden vaikutus jäi selvittämättä.

Esimerkkinä eliöyhteisön vuorovaikutuksesta on pohjoisamerikkalainen tutkimus, jonka mukaan poppelimetsien geneettinen monimuotoisuus on yhtenevä niistä riippuvaisten hyönteisten ja muiden niveljalkaisten lajidiversiteetin kanssa. Näin ollen yksittäisen lajin monimuotoisuudella voi olla laajempaa vaikutusta ekosysteemin biodiversiteettiin.<sup>7</sup> Samoin on havaittu, että nurmikot, joissa lajien keskimääräinen geneettinen muuntelu on runsasta, pystyvät ylläpitämään lajiston monimuotoisuutta tehokkaammin kuin vähän muuntelevat kasvustot.<sup>8</sup> Taus-talla lienevät monimutkaiset lajinsisäiset ja lajien väliset kilpailusuhteet. Kasvilajin geneettisellä monimuotoisuudella on myös vaikutuksia ekosysteemiin: poppelin, haavan ja tammen lehtikarikkeen lajinsisäisellä monimuotoisuudella on todettu olevan suuri vaikutus kuolleen orgaanisen aineksen hajottamiseen ja ravinteiden palauttamiseen kiertoon. Tosin geneettisen muuntelun ja ympäristötekijöiden suhteet eivät ole tässäkin tapauksessa riittävän hyvin tunnettuja.

## GEENIVAROILLA RUOKATURVAA

Geenivaroilla tarkoitetaan eri lajien geenejä, geenimuotoja ja geeniyhdistelmiä. Geenivarojen riittävä monimuotoisuus on ehdottoman tärkeää elintarvike turvalle. Kuitenkaan pelkkä maatalouteen liittyvä geneettisen monimuotoisuuden suojele ei riitä, vaan tarvitaan näiden geenivarojen hyödyntämistä kestäväällä tavalla.<sup>9</sup> Vaikka geenivarojen suojelussa on edistytty, ja varsinkin pitkälle jalostetut kasvilajikkeet ja eläinrodut ovat hyvin edustettuina, katveeseen ovat jääneet maatiaiskasvien ja eläinten alkuperäisrotujen sekä viljelykasvien luonnonvaraisten



sukulaisten geenivarat. Näiden lajien geeneistä voi löytyä monia hyödyllisiä tuotanto- ja sopeutumiskykyä edistäviä ominaisuuksia. Tällaisten geenivarojen suojeleminen ja hyödyntäminen ovat nykyisin entistä tärkeämpiä, kun reagoidaan ilmastonmuutoksen aiheuttamiin ruoantuotannon ongelmiin. Niitä voidaan käyttää apuna jalostettaessa esimerkiksi kuivuuden-, kasvitautien- ja tuholaistenkestäviä lajikkeita. Myös geenivarojen tarkka kartoitus on tärkeää: geenivarat ovat sitä arvokkaampia, mitä enemmän ja monipuolisempaa tietoa niistä on. DNA-tunnisteet ovat korvaamaton apu: niiden avulla voidaan tunnistaa luotettavasti esimerkiksi eri lajikkeet, kloonit ja genotyypit. Ei ole tavatonta, että geenivarakokoelmissa on samaa alkuperää edustavia näytteitä eri nimillä tai geneettisesti erilaista materiaalia samalla nimellä. Nämä virheet voidaan korjata DNA-tunnisteiden avulla.

Geenivarojen kattava suojeleminen ja järkevä käyttö antavat puitteet ruoantuotannon turvaamiselle. Taustalla on silti joukko ongelmia, jotka ovat luonteeltaan niin poliittisia kuin ilmastonmuutokseen, ympäristön kuormittumiseen ja luonnonvarojen riittävyyteenkin liittyviä. Tärkeää on tehdä oikeita valintoja viljeltävien kasvien ja tuotantoeläinten suhteen. Mitä tuotetaan missäkin tuotanto-oloissa? Saadaanko kehitettyjä parempisatoisia ja ravintoarvoltaan laadukkaampia kasveja, onko esimerkiksi mahdollista tuottaa enemmän proteiinisilläöltään parempia palkokasveja? Siirrytäänkö kasvipohjaiseen ruokavalioon, jolloin saataisiin sekä resurssi- että päästöetuja? Lihankulutuksen kasvu ei ole vielä taittunut. Arvioiden mukaan maapallon viljelykelpoisesta pinta-alasta jopa noin kolmannes käytetään eläinrehun tuotantoon, ja karjan tuottama metaani on suurin syy maatalouden päästöihin. Rehuvalinnoilla ja jalostuksella voitaisiin sentään vaikuttaa päästöjen tasoon. On kuitenkin nähtävissä viitteitä siitä, että kasvintuotanto suoraan ihmisruoaksi kehittynee nykyistä mittavammaksi. Olisi järkevää samalla monipuolistaa viljelyä eli käyttää laajempaa valikoimaa tuotantokasveja. Tämä olisi hyväksi koko peltoekosysteemille, toisi uusia ruokavaihtoehtoja kuluttajille ja parantaisi ruokaturvaa. Nousevia tulevaisuuden lupauksia ovat esimerkiksi tattari, kvinoa, lupiini ja öljyhamppu. Ne ovat kasveja, jotka tulevat toimeen vähäisellä typpilannoituksella ja mahdollistavat kestäviä kiertotalousratkaisuja kasvintuotannossa.

Banaani on maailmanlaajuisesti tärkeä ravintokasvi ja tulonlähde. Kasvavasta tuotannosta huolimatta banaanisadot eivät ole saavuttaneet toivottua tasoa. Taustalla on monia tekijöitä: kasvitaudit, tuhoeläimet,

huonontunut maaperän laatu, kuivuus ja muut ilmastonmuutoksen myötä yleistyneet sään ääri-ilmiöt. Banaanilajikkeita on arviolta noin 500. Kuitenkin yli 40 prosenttia tuotetuista banaaneista on geneettisesti yksipuolista Cavendish-lajiketta. Tällainen paikallisten lajikkeiden korvaaminen yksittäisellä tuottoisalla lajikkeella on valitettavan yleistä kasvintuotannossa, ja banaani on ääriesimerkki. Uhkana on paikallisen geneettisen monimuotoisuuden eli geenivarojen katoaminen ja toisaalta tautiepidemioiden leviäminen. Banaanin riskinä ovat erityisesti sienitaudit, yleisimpänä Panaman tauti. Irlannin suuri nälänhätä (1845–1852) on tunnettu esimerkki yhden lajikkeen monokulttuuriviljelmän toteutuneista riskeistä: perunarutto tuhosi sadon ja aiheutti vaikean nälänhädän. On tarpeellista tutkia tarkemmin eri banaanilajien geneettistä muuntelua, suojella geenivaroja ja kehittää kestävämpiä tuotantojärjestelmiä. Luonnonvaraiset sukulaiset voivat olla mainio muuntelun lähde jalostettaessa kestävämpiä kasveja tuotantoon.

Käsiteltäessä ruoantuotannolle olennaisia maatalouden geenivaroja ei pidä unohtaa metsä- ja kalageenivarojen merkitystä. Ilmastonmuutos kiihdyttää metsäpuiden kasvua ja pidentää kasvukautta. Tilanteessa on monta riskiä: muuttuvat sääolot häiritsevät puiden valmistautumista talveen ja talvilevosta heräämistä, ja toisaalta uhkana ovat lisääntyvät myrsky-, hyönteis- ja sienituhot. Metsäpuiden perinnöllisen monimuotoisuuden suojelussa tärkeintä on suojella geneettistä muuntelua, joka turvaa lajien selviytymisen kasvupaikan olojen muuttuessa.<sup>10</sup> Runsas muuntelu – myös muuntelu, jonka merkitystä ei vielä tunneta – on perusta sopeutumiselle. Tilanne on vastaava kalakannoilla, joilla vain riittävä muuntelun määrä auttaa selviämään pitkällä aikavälillä. Tenon lohjet ovat hyvä esimerkki muuntelun mahdollistamasta, jopa yllättävän nopeasta evoluutiosta: koiraslohet tulevat sukukypsiksi aiemmin ja jäävät pienemmiksi kuin ennen.<sup>11</sup> Tämän niin sanotun ”pienen lohjen” geenimuodon syyksi on esitetty muuttuneita valintapaineita. Kenties lohjen selviytymismahdollisuudet pitkällä merivaelluksella ovat heikentyneet esimerkiksi kalastuksen tai ympäristömuutosten takia, ja palaaminen kotijokeen nuorempana ja pienempänä voi parantaa henkiinjäämisen todennäköisyyttä. Liiallisen kalastuksen ja ympäristömuutosten aiheuttama kalakantojen taantuminen on maailmanlaajuinen huolen aihe. Kalakantojen romahdus olisi valtava ympäristökatastrofi ja vakava ongelma ruokaturvalle.

## IHMISEN VAIKUTUS GENEETTISEEN MUUNTELUUN

Mikä tahansa muutos ympäristössä saa aikaan valintaa ja muutoksia populaatioiden geneettisessä koostumuksessa. Muita populaatioita muokkaavia evoluutiotekijöitä valinnan ohella ovat uutta perinnöllistä materiaalia aikaansaavat mutaatiot, muuttoliike eli migraatio populaatiosta toiseen (geenivirta) ja nimenomaan pienissä populaatioissa korostuvat sattumavaikutukset, jolloin populaation geneettinen koostumus voi vaihdella rajustikin sukupolvesta toiseen pelkästään sen vuoksi, että geenit siirtyvät sattumanvaraisesti lisääntymisprosessissa. Niin sanottu pullonkaulavaikutus on ääriesimerkki evoluutioon vaikuttavasta sattumasta. Tätä käsiteltiin edellä gepardin yhteydessä, mutta pullonkauloja löytyy myös nykyihmisen evolutiivisesta historiasta, esimerkkinä vaihe, jolloin ihminen levittäytyi pieninä ryhminä Afrikan ulkopuolelle, ja toisena samankaltaisena myöhemmänä esimerkkinä Beringinsalmen ylitys ja Amerikan asuttaminen. Sattuma on vaikuttanut selvästi visentti eli euroopanbiisonin geneettiseen monimuotoisuuteen. Laji koki liian runsaasta metsästyksestä aiheutuneen pullonkaulan 1900-luvun alussa, jolloin se oli vähällä kuolla sukupuuttoon. Visentti kuitenkin säilyi eläintarhoissa kasvatettujen yksilöiden ansiosta, ja niiden jälkeläisiä elää nykyisin monilla alueilla eri puolilla Eurooppaa. Toisin kuin sattumanvaraisia geenikoostumuksia aiheuttava sattuma, luonnonvalinta edistää sopeutumista. Silti jos populaatio on kovin pieni, sattuma jyrää valinnan vaikutuksen, ja kehityssuunta voi olla epäedullinen ja muuntelun määrää vähentävä; samalla sukusiitosriski kasvaa. On aina ongelma, jos sattumavaikutus nousee hallitsevaksi evoluutiotekijäksi. Esimerkiksi äärimmäisen uhanalaisen lintulajin kaliforniankondorin kanta koostui pienimmillään 1980-luvulla vain 27 yksilöstä, ja vaikeaa luuston epämuodostumaa aiheuttava mutanttigeeni yleistyi karsivasta valintapaineesta huolimatta.<sup>12</sup>

Selviä esimerkkejä ihmisen vaikutuksesta muunteluun ovat domestikaatio eli eläinten kesyttäminen kotieläimiksi ja kasvien jalostaminen viljelyyn ja puutarhakasveiksi, ja toisaalta sopivien elinympäristöjen katoaminen rakentamisen ja maankäytön muiden muutosten takia. Domestikaation myötä tapahtunut keinotekoinen valinta eli valintajalostus on kaventanut geenivalikoimaa, jolloin muuntelu on vähentynyt. Valintajalostuksessa on tyypillisesti pullonkaulavaiheita, jolloin jatkoon valittavien yksilöiden geenit kattavat vain osan aiemmasta

geneettisen muuntelun määrästä. Voimakkaan maanmuokkauksen vuoksi monen lajin elinympäristöt ovat pienentyneet, pirstaloituneet ja jopa tuhoutuneet. Samalla on uhkana eristäytyminen, populaatioiden välisen muuttoliikkeen väheneminen ja muuntelun heikentyminen varsinkin pienissä populaatioissa, kun populaatio ei saa korvaavaa geeni-materiaalia ulkopuolelta. Ihmisen epäsuorat vaikutukset ympäristöön ilmastomuutoksen myötä ovat jo oma valtava kokonaisuutensa. Kun ympäristö muuttuu aiempaa nopeammin, sopeutumisenkin olisi oltava nopeaa, ja lajit eivät välttämättä kykene tähän geneettisesti.

Muuntelun määrän vähenemistä ei voi havaita yhtä helposti kuin populaatioiden ja lajien taantumista ja tuhoutumista. Olisi kuitenkin tärkeää saada tietoa geneettisestä muuntelusta, jos halutaan tehdä luotettavia uhanalaisuusarviointeja ja kehittää tehokkaita suoje-lu-toimia: valitettavan usein geneettinen tieto on niukkaa tai puuttuu kokonaan. Kuten edellä tuli esille, kattavasti tutkitun gepardin geneet-tinen muuntelu on vieläkin vähäisempää kuin mitä voisi olettaa yksi-lömäärän perusteella. Syynä on lajin geneettinen historia, joka sisältää rajuja pullonkaulavaiheita, jolloin sekä yksilöiden että muuntelun määrä ovat romahtaneet. Siksi gepardeilla ei ole vastaavaa sopeutumis-kykyä muuttuviin ympäristöoloihin kuin monella muulla eläimellä, ja eläintarhoissakaan niiden lisääntyminen ei onnistu yhtä hyvin kuin muilla kissaeläimillä, esimerkiksi leijonilla. Sukupuuttoon kuolemista edeltää aina geneettisen muuntelun romahtaminen. Samalla voi kadota monia hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten tautien vastustuskyky ja yli-päänsä kyky sopeutua muuttuviin oloihin. Yleistäen voidaan sanoa, että mitä enemmän muuntelua on, sitä pienempi on riski tuhoutua, ja toisinpäin: geneettinen muuntelu on avain lajin ja sen populaatioiden menestykseen. Äärioloissa, esimerkiksi kuivuuskautena tai ankaran tautiepidemian aikana, riittävä geneettinen muuntelu voi mahdollistaa populaation kyvyn säilyä. Vähentynyt geneettinen muuntelu ja sen seu-raukset eivät vaikuta vain lajeihin ja ekosysteemeihin, vaan samalla voi kadota ihmisen kannalta hyödyllisiä geenivaroja, joita ruoantuotanto, teollisuus ja lääketiede voisivat käyttää.

Klassinen esimerkki nopeasta sopeutumisevoluutiosta on heinä-kasvien kyky selviytyä raskasmetallien saastuttamilla kaivosalueilla, esimerkkilajina tuoksusimake, *Anthoxanthum odoratum*.<sup>13</sup> Nämä heinä-populaatiot ovat kehittyneet geneettisesti eri suuntiin hyvin suppealla alueella sen mukaan, paljonko maaperässä on raskasmetalleja. Kun

valintapaine on kova, tällainen eriytyminen on mahdollista mittavasta populaatioiden välisestä geenimateriaalin vaihdosta eli geenivirrasta huolimatta. Lajilla oli selvästi riittävästi geneettistä muuntelua, ja joukosta löytyi myös toleranssia edistäviä geenimuotoja, jotka yleistyivät nopeasti saastuneella alueella. Eri suuntiin tapahtuvat geneettiset muutokset voivat jossain vaiheessa estää populaatioiden välisen lisääntymisen eli johtaa lisääntymisisolaatioon ja edelleen uusien lajien kehittymiseen, mikä kuvastaa sopeutumisen ja lajiutumisen yhteyttä. Esimerkki heinien raskasmetallitoleranssista kuvastaa monien populaatioiden luonnollista evoluutio- ja sopeutumiskykyä muuntelun ollessa riittävää. Sen sijaan jos geneettistä muuntelua on niukasti, sopeutuminen vaikeutuu. Kattava luonnonsuojelu ottaa huomioon geneettisen muuntelun. Näin muuttuviin ympäristöoloihin on mahdollista reagoida, olivatpa taustalla luonnon tai ihmisen aikaansaamat tekijät.

### **MITÄ PITÄISI TEHDÄ GENEETTISEN MONIMUOTOISUUDEN SÄILYTTÄMISEKSI?**

Suojelussa keskitytään usein vahvasti populaatiokokoon ja sen lisäämiseen. Se on yleensä hyvä päämäärä, mutta tällaisista demografisista toimista saattaa seurata jopa haitallisia geneettisiä vaikutuksia, mikäli populaatio kasvaa vain muutamien erityisen hedelmällisten yksilöiden jälkeläisistä. Tämän tyyppinen tilanne on esimerkiksi joillakin tarhoissa kasvatetuilla ja luontoon palautetuilla eläimillä, esimerkiksi biisonilla, punasudella, espanjanilveksellä ja muuttohaukalla. Seurauksina saatavat olla geneettisen koostumuksen yksipuolistuminen ja lisääntynyt sukusiitos. Populaatiokoolla tai pikemminkin tehollisella populaatiokoolla on suuri merkitys geneettisen muuntelun kannalta. Tehollinen populaatioko on lukuarvo, joka kertoo, minkä kokoista ideaalipopulaatiota tutkittava populaatio vastaa toiminnaltaan. Ideaalipopulaatiossa yksilöt pariutuvat satunnaisesti, sukupuolia on sama määrä, perhekoossa ei ole vaihtelua, sukupolvien välillä ei ole päällekkäisyyttä ja kaikilla yksilöillä on sama mahdollisuus lisääntyä. Todellisuudessa tehollinen populaatioko, jonka avulla voidaan ennustaa muuntelun säilyminen, on yleensä reilusti pienempi kuin koko populaation koko. Käytännössä lajin evolutiivinen potentiaali säilyy parhaiten ja sukupuuttoon kuoleminen riski vähenee, jos lajin yksilöitä on monessa geneettisesti

omaleimaisessa ja riittävän suuressa populaatiossa. Tällöin muuntelun kirjo on laaja ja riski on hajautettu, ja myös vaikutus ekosysteemipalveluihin on edullinen.

Kaiken kaikkiaan geneettisen monimuotoisuuden säilyttämiseen tähtäävän toiminnan lähtökohtana ovat 1) kattavan tiedon hankkiminen sekä luonnonpopulaatioiden että ihmisen muokkaamien populaatioiden geneettisistä ominaisuuksista ja niissä tapahtuvista muutoksista sekä 2) tiedon käyttäminen tavalla, joka tukee geneettisen muuntelun säilymistä riittävällä tasolla, jolloin mahdollisuus evoluutioon säilyy.

## MITÄ SINÄ VOIT TEHDÄ



- ▶ Levitä tietoa monimuotoisuuden säilyttämisen tärkeydestä.
- ▶ Tallenna riittävästi hyvin dokumentoitua materiaalia geenipankkeihin ja muihin kokoelmiin.
- ▶ Suosi alkuperäisiä kotieläinrotuja tuotanto-, jalostus, seura- ja harrastuseläiminä.
- ▶ Kasvata tuottajana, kotipuutarhurina ja kaupunkiviljelijänä vanhoja viljely- ja koristekasveja (varsinkin siemeniä on helppo ostaa) – uusia makuelämyksiä odotettavissa.
- ▶ Jätä metsään lahoppuuta – enemmän sopivia elinympäristöjä lahoppuusta riippuvaisille lajeille.
- ▶ Perusta niitty hoidetun nurmikon sijasta – oma työmääräkin vähenee.
- ▶ Kierrätä ja tee muitakin ekotekoja – luonto ja sen monimuotoisuus kiittävät.

**8. GENEETTINEN MUUNTELU  
LAJIEN SOPEUTUMISEN JA  
SÄILYMISEN ELINEHTONA**

1. Ferguson ym. 2003.
2. Ralls ym. 2018.
3. Phys.org 2015.
4. Dreger ym. 2016.
5. Lewis ym. 2015.
6. Schöb ym. 2015.
7. Zhang ym. 2015.
8. Prieto ym. 2015.
9. Roa ym. 2016.
10. Fady ym. 2016.
11. Helsingin yliopisto 2018.
12. Ralls & Ballou 2004.
13. Antonovics 2006.